哈密市生态环境效益时空分析

高鹏文[1]，阿里木江·卡斯木[1,2]，图尔荪阿依·如孜[1]，赵孟辰[1]，
（1.新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐，830054；2.新疆师范大学,丝绸之路经济带城镇化发展研究中心，新疆 乌鲁木齐，830054）

摘 要：本文通过 2000、2008 年及 2018 年 3 期 Landsat 系列数据，利用主成分分析绿度、湿度、干度、热度构建遥感生态指数（RSEI），同时采用标准差椭圆及不同生态等级的重心，对干旱区城镇哈密市伊州区的生态质量进行遥感动态监测，并分析生态质量的空间扩展。结果表明：哈密市伊州区遥感生态指数均值从 0.22、0.31 上升到 0.40，呈现出上升趋势，生态质量总体转好，但生态质量水平较低；生态环境变好的区域集中在伊州区城区的周围，呈环形分布，生态变差的区域主要在北部的东天山南坡地带以及城区的西南部未开发的戈壁；根据标准差椭圆及不同生态等级重心的变化得到，伊州区生态质量较好的区域在空间上呈现出由北向南扩展，总体生态较好区域从 2000—2018 年均呈东南一西北走向。

关键字：遥感生态指数；标准差椭圆；生态质量；时空分布；哈密市

随着西部大开发政策的实施，西北干旱区城市空间扩展迅速，城市建设用地与生态用地的矛盾也日益凸显，在当前的城市扩展及生态监测中，遥感技术以其覆盖范围广、时效性快、成本较小的优势被人们广泛应用。同时，在对城市的、草地、湿地、沙漠、河流等地理单元进行评估监测时也用到了这一技术[1-9]。例如，通过水体指数以及改进型水体指数对流域的生态环境进行监测[10-11]。利用 MODIS 数据提取地表温度来研究区域热岛效应[12]，或者将遥感技术用在土地利用变化[13-14]、不透水面层覆盖度[15]、区域植被覆盖度及动态变化[16-17]等来开展城市生态与城市扩展的关系及其评价，但大多都只是在单因素层面，或者也是定性的描述城市生态变化情况。在定性的分析中评价体系也多为人为设定评价权重，这在一定程度上不能全面反映自然过程的真实情况。为此，徐涵秋[18]提出了新型的遥感生态指数（remote sensing ecology index，RSEI）评价体系，该指数是基于多指标集合而成，同时也是在人为干预的情况下利用主成分分析来确定权重获取贡献率。这一指数提出后，在城市[19-20]、自然保护区[21-22]、水土流失[23-24]得到了广泛应用，表明该指数可以有效反映区域生态环境质量。

哈密市是新疆的“东大门”，是内地进入新疆的门户，是“一带一路”发展过程中一个重要的节点城市，也是古丝绸之路重镇。哈密市在全疆交通、风电等领域发挥着重要作用，近 20 多年随着西部大开发等一系列政策的落实，城市空间扩展和城市生态环境有了较大变化，在此时间节点上来研究城市生态环境变化也成了人们关注的热点，为响应《哈密市土地利用总体规划 2010—2020》中加强规划实施动态监测与评估。因此，本文利用遥感生态指数来研究哈密伊州区 2000—2018 年生态环境质量，同时利用标准差椭圆法来探究城市空间扩展，以期为该区城市空间扩展监测及生态环境建设提供一定的科学依据。

1 研究区概况

哈密市位于新疆最东部，东接甘肃省酒泉市，西邻吐鲁番市与昌吉，南部与巴音郭楞接壤，北部与蒙古国相接，有 586.663 km 的国界线。哈密市地跨天山南北，被天山山脉分割为北部的巴里坤县和伊吾县以及南部的伊州区，市内有森林、草原、冰川，地貌主要有占总面积 4.5%的高山、1.5%的沙漠、27.9%的戈壁、65.5%的丘陵，其中已经被人类利用的面积仅占总面积的 29.35%，而哈密市的主要城镇分布于东天山南部的冲积平原上。哈密市是典型的温带大陆性干旱气候，全年晴天多，年均日照时间长达 3 358 h，为全国日照时数最多的地区之一。

因哈密市伊州区内存在大范围的荒漠戈壁，而城镇和人工绿洲较为集中，所以本文选取哈密市伊州区内的城镇核心区以及周边的团场绿洲作为本文的研究区域（如图 1）。

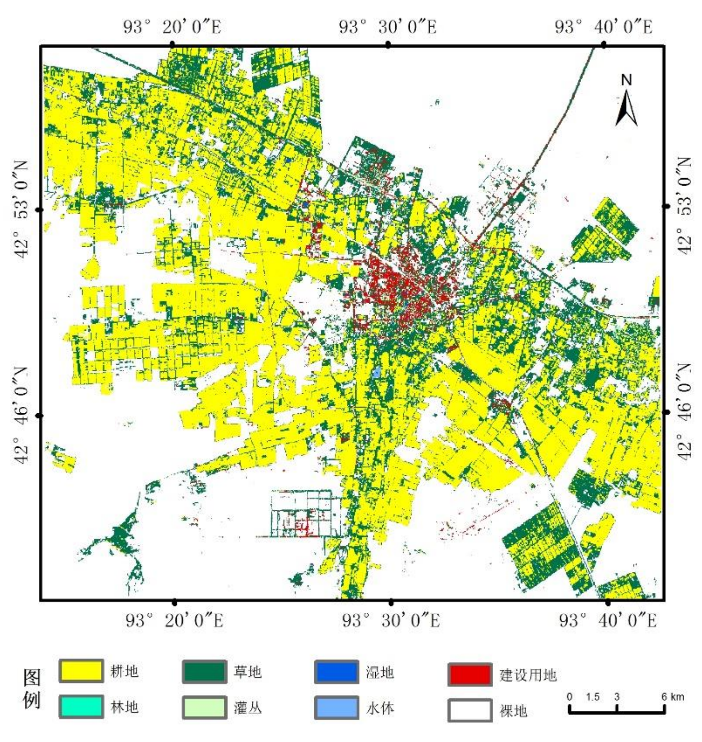


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Sketch map of the study area.

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本文利用 3 期 Landsat 系列遥感数据作为本研究的数据源，分别是 2000 年 9 月 6 日和 2008 年 8 月 11 日的 Landsat5 TM 影像以及 2018 年 9 月 15 日的 Landsat OLI 及 TIRS 影像数据，空间分辨率为 30m，选取了天气状况较好，云量均 1%且较近的 3 个时间段，从而使该研究分析有可比性。本数据源取自美国地质勘探局网站（http://glovis.usgs.gov）。土地利用数据来源于清华大学制作的全球 10m 分辨率的土地分类图。

在 ENVI5.3 中先利用 Radiometric Calibration 工具对 3 个时相的数据进行辐射定标，再通过 Flash 大气校正对已定标的影像进行校正，在本文中设定哈密市伊州区的平均海拔高度为 0.85km，气溶胶类型为城镇模式；对不同时期的影像进行配准，使用二次多项式和最近邻域像元法将均方差限制在 0.5 个像元内。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数

遥感生态指数（RSEI）适用于综合性反映区域生态环境质量的新型遥感生态指数[25]。该指数同时拟合了绿度、湿度、干度、热度 4 个环境分量，其中绿度用归一化植被指数来表示，湿度用缨帽变化的湿度分量表示，干度用裸地指数和建筑用地合成来表示，热度分量用地表温度来表示，较优于国家环境保护部在 2006 年出台相关的生态环境状况指数(EI)[26]。

（1）绿度指标

绿度指标是植物生长状态和营养信息指示的最佳因子，与植物的叶面积指数、覆盖度以及生物量密切相关[27]。

$$\mathrm{NDVI} = (\rho_{NIR} - \rho_R)/(\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (1)$$

式中，ρ_{NIR}和ρ_R分别表示近红外与红外波段的反射率。

（2）湿度指标

利用遥感缨帽变换获取的湿度分量可以较好地反映植被、水体和土壤的湿度状况[28]。

$$\mathrm{WET}=A_1\rho_{\mathrm{B}}+A_2\rho_{\mathrm{G}}+A_3\rho_R+A_4\rho_{\mathrm{NIR}}+A_5\rho_{\mathrm{SWIR_1}}+A_6\rho_{\mathrm{SWIR_2}} \quad (2)$$

式中，ρ_{B}、ρ_{G}、ρ_{R}、ρ_{NIR}、$\rho_{\mathrm{SWIR_1}}$、$\rho_{\mathrm{SWIR_2}}$依次是蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1 波段、短波红外 2 波段的反射率（同公式 3）A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6分别是湿度系数，在 landsat5 影像中，A_1=0.031 5、A_2=0.202 1、A_3=0.310 2、A_4=0.159 4、A_5=-0.6806、A_6=-0.610 9，在 Landsat 8 影像中A_1=0.151 1、A_2=0.197 3、A_3=0.328 3、A_4=0.340 7、A_5=-0.7117、A_6=-0.455 9。

（3）干度指标

造成城市区域变“干化”的主要原因是建筑用地的扩展以及大片区的裸地，为此选用裸地指数（SI）和建筑指数（IBI）合成作为干度指标，表示为（NDSI）[28]。

$$\mathrm{NDBSI}=(\mathrm{IBI}+\mathrm{SI})/2 \quad (3)$$

$$\mathrm{IBI}=\left(\frac{2\rho_{\mathrm{SWIR_1}}}{\rho_{\mathrm{SWIR_1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}-\rho_{\mathrm{NIR}}(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{R}})-\frac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{G}}+\rho_{\mathrm{SWIR_1}}}\right)/\left(\frac{2\rho_{\mathrm{SWIR_1}}}{\rho_{\mathrm{SWIR_1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}+\rho_{\mathrm{NIR}}(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{R}})+\frac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{G}}+\rho_{\mathrm{SWIR_1}}}\right) \quad (4)$$

$$\mathrm{SI}=\left[(\rho_{\mathrm{SWIR_1}}+\rho_{\mathrm{R}})-(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{B}})\right]/\left[(\rho_{\mathrm{SWIR_1}}+\rho_{\mathrm{R}})+(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{B}})\right] \quad (5)$$

（4）热度指标

热度指标（LST）利用地表实际温度来表示，本文对 Landsat 系列热红外数据进行反演，其中 Landsat8 影像是对第 10 波段进行反演，因为第 11 波段的精度不够[24]。

$$\mathrm{LST}=T/[1+(\lambda T/\rho)\ln\varepsilon] \quad (6)$$

$$T=K_2/\ln\left(\frac{K_1}{L_{6/10}}+1\right) \quad (7)$$

$$L_{6/10}=gain*DN+bias \quad (8)$$

式中，LST 为地表温度，T为传感器温度值，K_1、K_2为定标系数；$L_{6/10}$分别为 TM/TIRS 的热红外波段的辐射值，对应 B6、B10 波段；DN 为像元灰度值，$gain$、$bias$依次为波段增益值、偏置值；λ为热红外波段的中心波长；ρ为波尔兹曼常数；ε为地表比辐射率，取值参见文献[29-30]。在 TM 影像中，K_1=607.76 W·m^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1}，K_2=1 260.56 K，$gain$=0.055、$bias$=1.182 43，λ=11.435 μm；在 OLI/TIRS 影像中，K_1=774.89 W·m^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1}，K_2=1 321.08 K，$gain$=3.342、$bias$=0.1，λ=10.900 μm；$\rho=1.438\times10^{-2}$ m·K。

（5）遥感生态指数的创建

RSEI 是通过主成分分析方法来算 4 个指标，在算出每个指标后会形成 4 个单波段影像，因其每个波段的的量纲不一致，利用归一化操作使其统一在 0～1 之间，再利用 layer stacking 将 4 个指标合成多波段影像，再进行 PCA 分析。

$$RSEI_0=(1-\{PC1[f(NDVI,WET,LST,NDBSI)]\} \quad (10)$$

$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{0min})/(RSEI_{0-max}-RSEI_{0-min}) \quad (11)$$

$RSEI$ 为遥感生态指数，是通过 4 个指标综合得到，$NDVI$为绿度指标、WET为适度指标、LST为热度指标、$NDBSI$为干度指标；$PC1$代表通过主成分分析后得到的第一主成分，RSEI0 为遥感生态指数初始值，即对 PC1 进行正规化处理后的值；$RSEI$ 为$RSEI_0$归一化后的值，其中$RSEI_{0-min}$、$RSEI_{0-max}$分别代表$RSEI_0$的最小值、最大值。

2.2.2 标准差椭圆及重心分析

本文利用标准差椭圆模型来分析哈密市伊州区生态质量的空间变化特征，先计算标准差椭圆重心[31]。

$$M(\overline{X},\overline{Y})=\left|\frac{\sum_{i=1}^{n}w_ix_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i},\ \frac{\sum_{i=1}^{n}w_iy_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right| \quad (12)$$

式中：$M(\overline{X},\overline{Y})$表示该生态等级下分布重心；n 为分析单元数目；$w_i$为分析单元的属性值，作

为i对应分析单元的空间权重，($w_i y_i$) 表示第i个单元内的中心坐标。

3 结果与分析

3.1 生态环境指标主成分分析

由表 1 可知，2000、2008 年和 2018 年由植被指数、湿度分量、干度指数及地表温度主成分合成的遥感生态指数变换图中第一主成分的特征值贡献率分别为 81.85%、92.10%表和 84.41%。3 个时期中第一主成分的值均超过了 80%，表明第一主成分可以表示大部分的特征值，所以在本文构建遥感生态指数中是成立的。同时可以看到 NDVI 和 WET 分量为正值，而 NDSI 和 LST 则出现了大量的负值，这表明绿度分量和湿度分量在生态环境的表征过程中起着正相关的作用，同时干度指数和热度指数在生态环境较差的年份表现的比较出，其在该过程中起负相关的作用。

表 1　遥感生态指数的主成分分析

Table 1　Principal component analysis of remote sensing ecological index

年份	指标	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3	第四主成分 PC4
2000	归一化植被指数	0.615	0.262	-0.334	-0.664
	湿度分量	0.235	0.638	-0.348	0.645
	干度指数	0.631	-0.671	-0.109	0.375
	地表温度	0.41	0.272	0.869	0.05
	特征值	0.047	0.007	0.003	0.001
	特征值贡献率（%）	81.85	11.99	5.19	0.95
2008	归一化植被指数	0.559	0.147	-0.348	-0.739
	湿度分量	0.406	0.302	-0.578	0.639
	干度指数	0.615	-0.714	0.274	0.194
	地表温度	0.381	0.615	0.685	0.087
	特征值	0.1	0.006	0.002	0.001
	特征值贡献率（%）	92.1	5.6	1.42	0.85
2018	归一化植被指数	0.678	-0.026	-0.141	-0.721
	湿度分量	-0.6	0.462	0.203	-0.621
	干度指数	0.327	0.886	-0.132	0.301
	地表温度	0.271	0.02	0.96	0.066
	特征值	0.062	0.008	0.003	0
	特征值贡献率（%）	84.41	11.14	4.1	0.33

在表 2 可以看出，从 2000—2018 年 RSEI 的均值都是增加的，依次为 0.22、0.31、0.40，由于受干旱区城市生态条件限制，遥感生态指数的均值不是很高，说明该地区的生态状况较为简单，绿化程度不高，这一点也可以在该研究区内 NDSI 的均值以及对第一主成分的贡献度可以看出，载荷值均较高，NDSI 的均值在 3 个时段内都在 0.87 以上，该数值也表明在研究区内 NDSI 的像元个数也是较多，像元较差的基数较大，对总体研究区的生态评价起负作用。由 NDVI 的均值可以看出，在 18 年间先增大后减小，但是变化的区间不大，NDVI 的标准差也是同样的变化趋势，说明该研究区内城市绿地扩展以及周围人工绿洲的发展方向相对固定。WET 的均值在 3 个时段内都是低于 0.4，说明该研究区的湿度较差，同时也符合该地区处于干旱区的大背景。LST 的均值也呈现出减小的趋势，从 2000 年得 0.63 降低到 2018 年的 0.48，说明在该研究区生态处于改善阶段，同时绿色生态功能区在增加，对区域降温增湿有明显作用，在 NDVI 和 WET 的变化中也印证了该现象。总体上哈密市伊州区的生态状况自 2000—2018 年间是处于逐渐好转的状态，其中干度和热度起着负相关的作用，绿

度和湿度起着正相关的作用，但是总的生态水平较低，RSEI 的均值均低于 0.5。

表 2 4 个指标及遥感生态指数 RSEI 的均值变化

Table2 Mean changes of four indicators and remote sensing ecological index RSEI

年份	项目	NDVI	WET	NDSI	LST	RSEI
	均值	0.489	0.261	0.905	0.633	0.223
2000	标准差	0.14	0.087	0.081	0.156	0.174
	对 PC1 的载荷	0.91	0.48	-0.94	-0.85	
	均值	0.527	0.357	0.876	0.58	0.313
2008	标准差	0.181	0.062	0.121	0.239	0.23
	对 PC1 的载荷	0.89	0.6	-0.92	-75	
	均值	0.505	0.278	0.942	0.481	0.396
2018	标准差	0.178	0.064	0.043	0.188	0.207
	对 PC1 的载荷	0.94	0.42	-0.86	-0.75	

3.2 生态环境质量分级

为了使 RSEI 在空间上更加清晰，便于对比不同时期的生态环境质量的变化，将 3 期遥感生态指数分为 5 个等级，在分级前对每期影像都做了归一化处理使其像元值都在 0～1 之间，方便对比不同时期的影像，以 0.2 为一个间隔分成 5 个等级（图 2），依次为差、较差、中等、良好、优。最后对不同等级等级的生态质量作出空间面积统计及其对应在该影像上的比例。

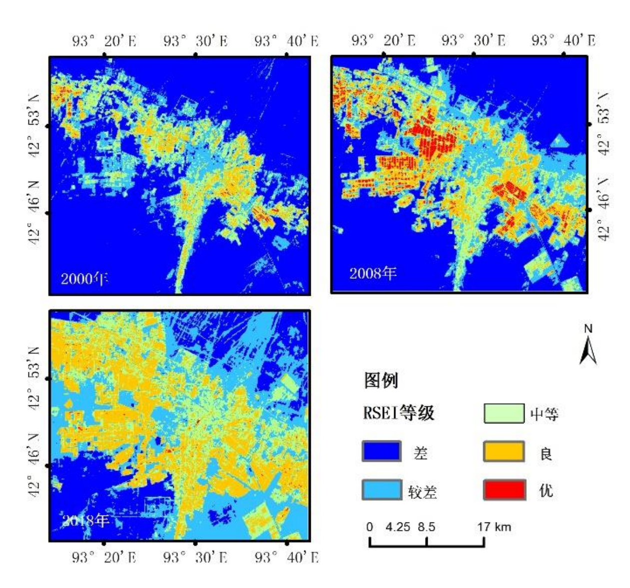


图 2　2000—2018 年哈密市伊州区 RSEI 分级

Fig.2 RSEI classification diagram of izhou district, hami city from 2000 to 2018

在遥感生态指数等级中可以看出来（表 3），较差等级的占比在 3 个时间段内持续下降，分别是 67.94%、50.15%和 21.69%。整体下降了 46.25%，可见哈密市伊州区 2000—2018 年间城市周围大部分未开发的区域均合理利用，其植被覆盖度有很大程度的改善，同时裸地的面积减少，生态环境质量差的区域逐年减少；较差等级在 2000、2008 年和 2018 年的百分比均处于上升趋势，依次为 15.08%、18.90%和 33.80%。可以看出在伊州区内较差的区域逐年增加，从图 2 中看出该等级的面积主要扩展在东南部和西北部地区，主要由差变为较差等级，生态质量有一定程度的好转，但总体上还是处于较差的状态；中等级的变化从 2000 年的 10.79%增加到 2018 年的 20.16%，增幅近 200%，处于增加的状态，在 2018 年哈密市伊州区

的生态状态差、较差、中等、良的等级面积占比相对均等，都在 25%左右，说明在 2018 年城市总体生态相较于 2000 年有了较大程序的改善。

表 3　2000—2018 年哈密市伊州区遥感生态指数等级面积及其占比

Table 3　remote sensing ecological index grade area and its percentage in yizhou district, hami city from 2000 to 2018

RSEI 等级	2000 年		2008 年		2018 年	
	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%
差（0～0.2）	927.82	67.94	684.91	50.15	296.17	21.69
较差（0.2～0.4）	205.88	15.08	258.11	18.90	461.66	33.80
中等（0.4～0.6）	147.34	10.79	190.83	13.97	275.36	20.16
良（0.6～0.8）	80.94	5.93	184.9	13.54	330.17	24.18
优（0.8～1）	3.74	0.27	46.99	3.44	2.39	0.18

优等级的变化呈现先增加后减小的趋势，从 2000 年到 2008 年再到 2018 年面积占比从 0.27%增加到 3.44%再降到 0.18%。该变化与近年伊州区在城镇外围西南部和东南部规划建设工业园区发展工业和农业转型有关。也因上述措施使得裸地面积减少，绿色植被的覆盖度增加，建设用地范围增加。2008 年生态优的区域主要作物是棉花，而在 2018 年同一区域的生态则降低为生态良，其因在于近 10 年哈密农业转型，将原有种植棉花的区域改为经济产值较高的枣树等作物。由于棉花相比于枣树同期的叶绿素含量较高，从遥感影像反演得出棉花的 NDVI 值高于枣树的 NDVI 值，在计算遥感生态指数时 NDVI 值得特征贡献率较高，因此使该区域在两期影像上存在不同生态等级的变化。

3.3 生态环境质量变化

为了进一步分析哈密市伊州区在 18a 间生态环境质量的差异性，在 RSEI 的基础上对每 2 期的数据进行了差值处理，从而来分析每个区间内生态变差或变好的空间区域以及相应的面积。

表 4 2000—2018 年哈密市伊州区遥感生态指数等级变化检测

Table 4　detection of the change of remote sensing ecological index level in yizhou district of hami city from 2000 to 2018

等级	2000-2008 年		2008-2018 年		2000-2018 年	
	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%
变好	39.25	2.87	21.32	1.56	97.5	7.14
不变	1,048.21	76.75	1,058.13	77.48	1,173.19	85.90
变差	278.28	20.38	285.46	20.90	95.03	6.96

从表 4 可以看出 2000—2008 年生态变好的区域面积达 39 km²，占比为 2.87%，结合图 2 可知，生态转好的区域集中在哈密市西南方和东南方，这是由于原哈密市在推动农业转型的基础上，棉花等作物的大量种植提高了植被覆盖度以及湿度，从而影响了区域遥感生态指数的变化；生态变差的区域面积达到 278 km²，所占比例远大于生态良好的区域面积占比。结合图 3 可以看出，生态变差的区域主要集中在东北部还有研究区的中心，即伊州区北部与东天山南坡相连的戈壁以及伊州区中心区域和城南的回城区域。究其原因，主要是 2000—2008 年间，伊州区的城市空间不断扩展，城镇周边人工绿洲被大面积开垦，生态遭到严重破坏。但正是因为人工绿洲的大面积扩展，使得伊州区遥感生态指数均值有较小幅度的增加，同时由表 4，2000—2008 年生态改变的区域面积为 1 048 km²，占比达 76.75%，整体生态较差，8 a 间改变较小，整体的遥感生态指数均值也较小，此与表 2 所得结果均值变化一致。

从图 3 可知，三期变化监测中生态变差的区域较为分散，生态变好的区域分布在生态变

差的区域外围，且相互呈现环状嵌套分布。2008—2018 年间生态变好的区域不明显，这是由于 2000—2008 年生态变差的人工绿洲外围又出现新的绿洲，而新绿洲成为 2008—2018 年间生态变好的主要区域。由此可知，有新绿洲出现时总会伴随着生态质量的改善。因此，干旱区城市的扩展就是基于绿洲的扩展，而在哈密市伊州区近 18a 的绿洲扩展基本上都是人工绿洲的扩展。所以在合理利用水资源的前提下，可以拓展人工绿洲的范围从而提高生态质量；从图 3 中可以看出哈密市伊州区生态质量提高范围较大，生态变好的区域达到 7.14%，面积达到 97 km^2，主要集中在伊州区城镇的西部、南部和东部地区，表现为以农业用地为主的人工绿洲的增加。而生态质量变差的区域多位于北部，北部区域则是近 18 a 来伊州区城镇扩展的主要方向。

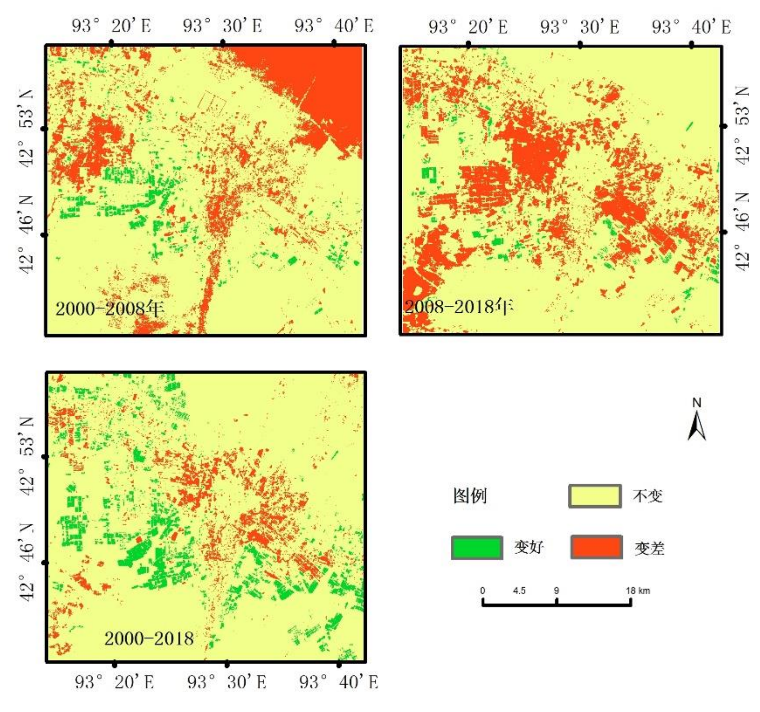


图 3　2000—2018 年哈密市伊州区 RSEI 变化检测图

Fig. 3 change detection diagram of RSEI in yizhou district, hami city from 2000 to 2018

2000—2018 年间变差的区域有 95 km^2，占比 6.95%，变差区域主要为快速扩展的城镇不透水面。以伊州区城市中心为原点在周围出现了斑块相对集中的较差区域，该区域即为近 18 a 内快速扩展的村镇及兵团的团场。综合表 4 可知，生态变好的区域在逐年增加，变差的区域降幅较大，不变的区域也较为稳定，从数值上看出哈密市伊州区的生态稳定是低水平的，然而低水平的生态稳定也为干旱区内的城市经济、城市生态和团场生态状况的改善作出了一定贡献。

总体上哈密市伊州区近 18 a 生态变好的区域出现在南部，这与哈密市政府关于《丝绸之路经济带创新试验区（哈密高新区）实施方案》中提到的打造南部循环经济产业园、南部区域以科技产业推动高效的农业转型有较大关系；北部区域呈现出变差区域减小的趋势，该区域 2008 年前均未开发，在近 10 a 该区域变好的情况印证了哈密市政府对该区域进行规划，大力实施北部新兴产业园，展开风电等新能源产业的发展。

3.4 标准差椭圆法分析生态质量空间分布

标准差椭圆法是用来描述空间点的密集程度及分布范围的一种典型方法，本文利用每一期的遥感生态指数形成的斑块范围转换成矢量面文件，再将面转化为点文件从而实现了标准差椭圆的构建。可以有效研究生态质量在空间范围内一定方向的移动，本文结合了该方法来分析每一年整体生态质量的扩展方向以及范围。从空间角度分析，由图 4 可知 3 个时间段内

的标准差椭圆长轴的方向是一致的，说明哈密市伊州区在近 18 a 内城镇生态扩展的方向按照东南—西北走向，而该方向与人工绿洲的扩展方向相同，其原因在于哈密市伊州区的城区及周围团场都是沿着铁路和国道主干线分布，同时伊州区地处天山东段的南坡冲积扇，地势北高南低由此产生高度差，故发展其他产业时受限，因此决定了伊州区城镇及团场沿线分布的格局；从时间角度来看，2018 年椭圆的短轴相较于 2008 年和 2000 年，呈现增加的趋势，说明伊州区生态质量在未来发展方向主要向南北两侧发展，而长轴 2008 年的扩展趋势较为明显，但在 2018 年有所减缓。

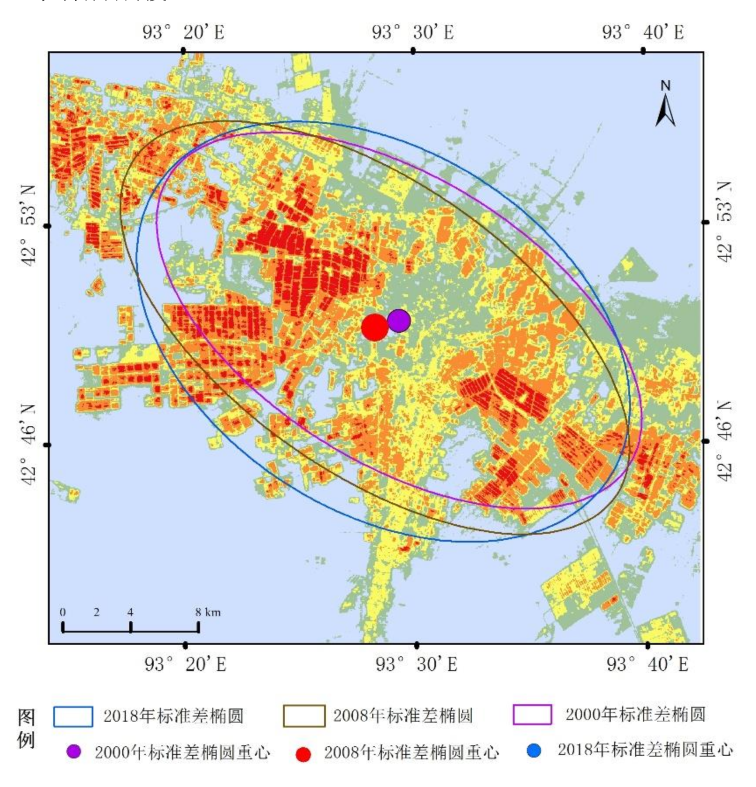


图 4 标准差椭圆生态质量空间分布

Fig.4 standard deviation spatial distribution of ecological quality of ellipse

从近 10a 的发展对应的标准差椭圆可以发现，城乡结合部发展更加紧密，表现在该区域标准差椭圆的短半轴在增加，而长半轴在减小，生态较好区域连成片，这与哈密加快了伊州区中心与周围团场乡村的结合有关。其中以沁城为代表的区域被纳入国家旅游扶贫试点村为契机，积极开发生态观光、游园采摘、民俗体验等扶贫旅游，可以看出效果明显。

3.5 不同生态质量在空间的转移分析

从图 5 可以看出，生态较差的重心较低，从 2000—2018 年不断的向西南移动，重心移动了 3.81 km，相较于其他等级的转移距离，在空间位置上偏转较多，也说明哈密市伊州区在推进生态治理时，主要压缩的方向就是向西南移动，在该区域还存在大面积生态质量差的区域。为加大在此区域的治理，从 2017 年开始哈密市已开展了对潞新煤化工、大安特钢等的污染检测评估，以此加大对企业污染物排放的监管，从而提高该区域内生态质量；生态较差的偏转了 4.55 km，主要方向是从西北到东南，说明城市生态质量西北部改善的较好，而东南部较差的区域面积较大，这主要是因为在该区域存在大量的裸地以及红星一场工业园区，还有一个未开发的戈壁滩；中等的区域重心偏转不大，集中在城市核心区以及周围的人工绿洲，该地区生态变化稳定，空间变化不剧烈；良等级的空间转移不明显，主要方向是从东北方向转移到西南方向，说明在推进空间生态治理的过程中依照生态较差的方向在改进；生态优的斑块面积较少，但空间转移明显，从东北方向转向西南方向再转向东南方向，可以得出，哈密市伊州区生态质量优的区域常发生转变，不能很好地保持生态优的等级，易于被

破坏，表明干旱区城市及形成的周边人工绿洲在生态质量水平上总体较低，但一直在提高。

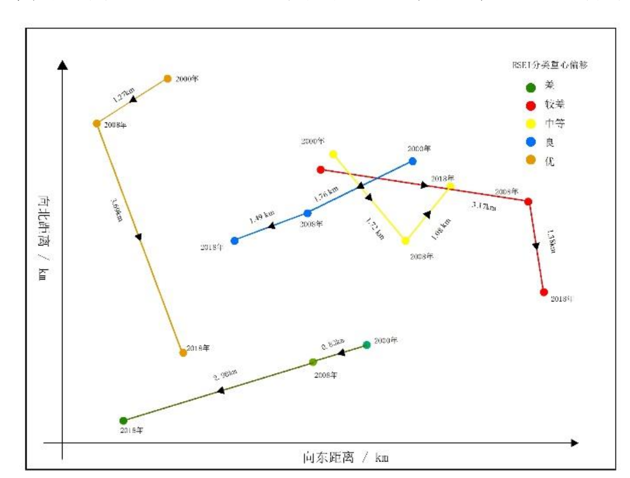


图 5　RSEI 分类重心偏移图

Fig .5 Deviation diagram of RSEI's classified barycenter

总体上在近 10　a，生态转好的现象得益于哈密市伊州区退耕还林、加大绿化力度、保护森林等措施。同时调整农业产业结构，围绕特色作物实施提质增效，以绿色生态为根基，加快了推进农业标准化建设，才有了生态差的区域在逐渐减小，生态优的区域在逐步扩大的结果。

4 结论与讨论

（1）通过主成分分析和载荷分析，在哈密市伊州区内绿度和湿度对 RSEI 起正相关的作用，同时热度和干度对 RSEI 起负相关作用。其中，绿度和干度对该区域的影响最大，生态质量的改善主要得益于绿度分量的增加和干度分量的降低。在该研究区内湿度的影响较小，同时热度的负相关影响也小于干度分量，这主要是伊州区地处荒漠区，区内有大量的裸地和戈壁，从而影响了干度分量。

（2）哈密市伊州区遥感生态指数呈现增长趋势，均值依次为 0.22、0.31、0.40，可以得出，在该地区生态质量的总体水平不高，主要因为该地地处干旱区，但在研究时间内 RSEI 呈现递增的趋势，这对干旱区城镇人们生活水平有了极大的促进作用。

（3）根据伊州区生态质量遥感监测，生态环境在部分地区呈现恶化趋势，这对生态环境相对脆弱的干旱区城镇发展不利，但同时生态变差的区域呈现递减趋势，随着人工绿洲和城镇绿化的快速扩展，到 2018 年生态较差的占比从 2000 年的 68%降低到 21%。生态质量的改善速度异常快。

（4)城镇生态质量变好的区域主要集中在伊州区城区的周围，东部的红星一场和陶家宫、南部的花园子和回城、西部的火箭农场以及柳树泉区域，而在近 18a 生态变差的区域为主城区和周边团场的场部中心。

（5）从标准差椭圆及不同生态等级重心的转变可以发现，伊州区生态质量较好的区域在空间上从北向南扩展，同时也在压缩南部生态较差的区域，3 个时段内，城镇生态扩展的主要方向依旧是东南——西北走向，这主要因为城镇的布局以及周围人工绿洲是沿交通线在分布。

本文从干旱区绿洲城市角度分析遥感生态指数在该地区的适应性，同时研究得出在干旱区内生态质量随着经济的发展、城镇空间快速扩展及周围人工绿洲的扩大，生态环境质量从城区内到城区外随时间变化不断提高，但总体的生态质量水平较低。从土地利用的角度分析，结合图 1 和图 2 可知，哈密市伊州区的生态质量较好及优的区域主要集中于草地、耕地、林地、灌木及河流存在的范围内，而在干旱区该范围又主要是自然绿洲与人工绿洲。从实地考

察可知，该地区主要的农作物为棉花及葡萄，而草地主要是枣树，林地主要是城市绿化所需的白杨树及榆树等。生态较差的区域主要集中于未利用地的范围，即大范围的戈壁与裸地。生态较差的与中等的区域主要分布在，通过人为改造的城市建设用地和工业园区内。由于干旱区生态比较脆弱，人工绿洲和建筑用地在不合理的调用水资源和过度开发时也会转化成裸地，为提高干旱区的生态用地质量，建议合理提高植被覆盖度，通过提高人工绿洲的面积，同时加大该地区的人工造林力度；在城市建设用地的建设中，提高城市绿化面积，从而实现该地区生态用地的合理开发及土地利用。

参考文献

[1] 阿里木江·卡斯木.人口密度、夜间光数据及 MODIS 的全球城市分类[J].遥感信息,2018,33(1):86-92.[Alimujiang Kasimu. Global urban characterization using population density, DMSP data and MODIS data [J].Remote Sensing Information ,2018,33(1):86-92.]

[2] Ochoa-Gaona S, Kampichler C, de Jong B H J, et al. Amulti-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico [J]. Forest Ecology Management, 2010,260: 618-627.

[3] Sullivan C A, Skeffington M S, Gormally M J, et al. The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment [J]. Biological Conservation, 2010, 143: 1529-1539.

[4] Xu Hanqiu. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China [J]. IEEE Journal Selected Topic in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2009, 2(2):74-79.

[5] 周文霞,石培基,王永男,等.河谷型城市生态系统服务价值效应——以兰州为例[J].干旱区研究,2017,34(1):232-241.[Zhou Wenxia, Shi Peiji,Wang Yongnan,et al. Effect of ecosystem service values of river valley city: a case study of lanzhou [J]. Arid Zone Research,2017,34(1):232-241.]

[6] 高炜,安如,王喆.基于微波遥感技术的干旱监测指数及其应用研究——以三江源区为例[J].干旱区研究,2017,34(3):541-550.[Gao Wei, An Ru,Wang Zhe. Drought index and its application based on microwave remote sensing technology:a case study in the three-river headwaters region [J]. Arid Zone Research,2017,34(3):541-550.]

[7] 刘娇,黄显峰,方国华,等.基于GIS缓冲区功能的塔里木河中游植被指数时空变化分析[J].干旱区研究,2018,35(1):171-180.[Liu Jiao, Huang Xianfeng, Fang Guohua,et al. Spatiotemporal variation of NDVI in the middle reaches of the tarim river based on GIS buffer

function [J]. Arid Zone Research,2018,35(1):171-180.]
[8] 王玉丹,陈浩,刘璨然,丁永建.ITPCAS和CMORPH两种遥感降水产品在陕西地区的适用性 [J]. 干旱区研究,2018,35(3):579-588.[Wang Yudan, Chen Hao, Liu Cuiran, et al. Applicability of ITPCAS and CMORPH precipitation datasets over shaanxi province [J]. Arid Zone Research,2018,35(3):579-588.]
[9] 王莉红,张军民,陈文皓,张亚如,康紫薇,师宏伟.玛纳斯河流域生态环境质量时空分异评价[J].干旱区研究,2019,36(4):1015-1023.[Wang Lihong, Zhang Junming, Chen Wenhao, et al. Spatiotemporal differentiation evaluation of ecological environment quality in Manas River Basin [J]. Arid Zone Research,2019,36(4):1015-1023.]
[10] 阿布都米吉提·阿布力克木,阿里木江·卡斯木,艾里西尔·库尔班,塔世根·加帕尔,樊自立.近40年台特玛-康拉克湖泊群水域变化遥感监测[[J].湖泊科学,2014,26(1):46-54.[Ablekim Abdimijit, Kasimu Alimujiang, Kurban Alishir, et al. Monitoring the water area changes in Tetima-Kanglayka lakes region over the past four decades by remotely sensed data [J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(1):46-54.]
[11] 陈前,郑利娟,李小娟,等.基于深度学习的高分遥感影像水体提取模型研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(4):43-49.[Chen Qian, Zheng Lijuan, Li Xiaojuan, et al. Water body extraction from high-resolution satellite remote sensing images based on deep learning [J]. Geography and Geo-Information Science,2019,35(4):43-49.]
[12] 张瑞钢,莫兴国,林忠辉.滹沱河上游山区近50年蒸散变化及主要影响因子分析[J].地理科学,2012,32(5):628-634.[Zhang Ruigang, Mo Xingguo, Lin Zhonghui . The trend and the principal influence factors of evapotranspiration in Hutuo River Basin during Last 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica,2012,32(5):628-634.]
[13] 尹占娥,许世远.上海浦东新区土地利用变化及其生态环境效应[J].长江流域资源与环境,2007, 16(4):430-434.[Yin Zhan'e, Xu Shiyuan. In land-use and land-cover and their effect on eco-environment in pudong new area of shanghai changes[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,16(4):430-434.]
[14] 朱寿红,孙玉杰,舒帮荣,王胜利,梁迅.规划政策影响下区域生态用地演变模拟研究——以南京市溧水区为例[J].地理与地理信息科学,2019,35(4):83-90.[Zhu Shouhong, Sun Yujie, Shu Bangrong, et al. Simulation on the evolution of regional ecological land by incorporating planning policies: a case study of lishui district, Nanjing city[J]. Geography and Geo-Information Science,2019,35(4):83-90.]
[15] 崔秋洋,潘云,杨雪.基于Landsat 8遥感影像的北京市平原区不透水层盖度估算[J].首都师范大学学报(自然科学版),2015,36(2):89-92.[Cui Xiuyang, Pan Yun, Yang Xue. Estimation of the impermeable layer coverage in the plain area of Beijing based on Landsat 8 remote sensing image[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2015,36(2):89-92.]
[16] 李佩武,李贵才,陈莉,等.深圳市植被径流调节及其生态效益分析[J].自然资源学报,2009,24(7):1223-1233.[Li Peiwu, Li Guicai, Chen Li, et al. Analysis of Shenzhen's vegetation: flood control and ecological benefit [J]. Journal of Natural Resources,2009,24(7):1223-1233.]
[17] 庞国伟,杨勤科,王春梅,等.像元二分模型参数确定方法对高分一号PMS数据估算植被覆盖度精度的影响[J].地理与地理信息科学,2019,35(4):27-33.[Pang Guowei, Yang Qinke, Wang Chunmei, et al. Influence of parameter determination methods of the pixel dichotomy model on the estimation accuracy of fractional vegetation cover by GF-1 PMS Data [J].

Geography and Geo-Information Science,2019,35(4):27-33.]
[18] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.[Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science,2013,33(5):889-897.]
[19] 刘智才,徐涵秋,李乐,唐菲,林中立.基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(4):728-739.[Liu Zhicai, Xu Hanqiu, Li Le, et al. Ecological change in the Hangzhou area using the remote sensing based ecological index[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2015,23(4):728-739.]
[20] 宋慧敏,薛亮.基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J].应用生态学报,2016,27(12):3913-3919.[Song Huimin, Xue Liang. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City,Northwest China based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(12):3913-3919.]
[21] 刘盼,任春颖,王宗明,等.南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价[J].应用生态学报,2018,29(10):3347-3356.[Liu Pan, Ren Chunying, Wang Zongming, et al. Assessment of the eco-environmental quality in the Nanweng River Nature Reserve, Northeast China by remote sensing [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(10):3347-3356.]
[22] 王丽春,焦黎,来风兵,张乃明.基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J].生态学报,2019,39(8):2963-2972.[Wang Lichun, Jiao Li, Lai Fengbing, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake wetland, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(8):2963-2972.]
[23] 张灿,徐涵秋,张好,唐菲,林中立.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.[Zhang Can, Xu Hanqiu, Zhang Hao, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of Southeastern China: Changting county, Fujian province [J]. Journal of Natural Resources,2015,30(6):917-928.]
[24] 李粉玲,常庆瑞,申健,刘京.黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测——以陕西省富县为例[J].应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.[Li Fenling, Chang Qinrui, Shen Jian, et al. Dynamic monitoring of ecological environment in loess hilly and gully region of loess plateau based on remote sensing: a case study on Fuxian county in Shaanxi province, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(12):3811-3817.]
[25] 李丽,张海涛.基于BP人工神经网络的小城镇生态环境质量评价模型[J].应用生态学报 ,2008,19(12):2693-2698.[Li li, Zhang Haitao. Assessment model of townlet eco-environmental quality based on BP-artificial neural network[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(12):2693-2698.]
[26] 董思宜,杨熙,王秀兰,等.永定河流域生态环境质量评价[J].中国人口·资源与环境,2013,23(11):348-351.[Dong Siyi, Yang Xi, Wang Xiulan, et al. Assessment of the eco-environmental quality in the Yongding river basin[J]. China Population, Resources and Environment,2013,23(11):348-351.]
[27] Goward S N，Xue Y K，Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements：an exploration with the simple biosphere model. Remote Sensing of Environment，2002,79（2/3）：225-242.
[28] 徐涵秋.水土流失区生态变化的遥感评估[J].农业工程学报,2013,29(7):91-97, 294.[Xu Hanqiu. Remote sensing assessment of ecological changes in soil and water loss areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(7):91-97, 294.]

[29] Yu X L, Guo X L, Wu Z C. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between radiative transfer equation-based method，split window algorithm and single channel method[J]. Remote Sensing, 2014, 6: 9829-9852
[30] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2005,71(6):613-621.
[31] 宋戈,杨雪昕,高佳.三江平原典型地区水田分布格局变化特征[J].中国土地科学,2017,31(8):61-68.[Song Ge, Yang Xuexin, Gao Jia. Study on the distribution patterns and characteristics of paddy cropland in the typical area of Sanjiang plain [J]. China Land Sciences,2017,31(8):61-68.]

Time and space analysis of ecological environment benefit in Hami City

GAO Peng-wen[1], Kasim·Alimujiang[1,2], Ruzi·Tursunayi[1], ZHAO Meng-chen[1],
(*1.College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University,Urumqi* 830054,*Xinjiang China;*
2.Research Center of Urbanization Development of Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University,Urumqi 830054,*Xinjiang China;*)

Abstract：Based on the Landsat series data in 2000, 2008 and 2018, this paper constructs the remote sensing ecological index (rsei) by using the principal component analysis of green degree, humidity, dryness and heat degree. At the same time, it uses the standard deviation ellipse and the center of gravity of different ecological levels to carry out the dynamic remote sensing monitoring of the ecological quality of Yizhou District, Hami City, an arid area, and analyzes the spatial expansion of the ecological quality. The results show that the average value of remote sensing ecological index in Yizhou District of Hami City rises from 0.22 and 0.31 to 0.40, showing an upward trend. The overall ecological quality is better, but the level of ecological quality is lower. The areas with better ecological environment are concentrated around the urban area of Yizhou District, in a circular distribution. The areas with worse ecological environment are mainly in the south slope of the East Tianshan Mountain in the north and the undeveloped area in the southwest of the urban area Wall: according to the standard deviation ellipse and the change of the center of gravity of different ecological levels, the area with better ecological quality in Yizhou district is expanding from north to south in space, and the area with better overall ecological quality is from 2000 to 2018 with southeast northwest trend.

key words: remote sensing ecological index； standard deviation ellipse； ecological quality；Spatiotemporal distribution；Hami City

---

收稿日期：2019-10-08；**接收日期：**2020-04-13
基金项目：国家自然科学基金项目（41661037）；新疆师范大学研究生创新基金项目（XSY201902009）资助
作者简介：高鹏文（1995-），男，硕士研究生，研究方向：资源环境遥感.E-mail：gaopengwen1995@163.com
通讯作者：阿里木江·卡斯木 E-mail：alimkasim@xjnu.edu.cn